新疆冬小麦不同产量群体冠层光截获与干物质分布特性分析

王立红[1,2]， 张宏芝[1,2]， 李剑峰[1,2]， 王 重[1,2]， 高 新[1,2]，
时 佳[1,2]， 张跃强[1,2]， 樊哲儒[1,2]， 赵 奇[1,2]

（1. 新疆农业科学院核技术生物技术研究所，新疆 乌鲁木齐 830091；2. 农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830091）

摘 要：研究不同产量水平冬小麦群体冠层不同层次光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation，PAR）截获、干物质分布及产量的影响，为缩小新疆冬小麦产量差距、提高光能资源利用和高产栽培提供理论依据。试验于2018—2019年在军户和奇台两个不同试验区进行，以当地主栽品种为试验材料，采用综合管理模式模拟了超高产（SH：≥9000 kg·hm^{-2}）、高产（HH：7500~9000 kg·hm^{-2}）、农户（FP：6000~7500 kg·hm^{-2}）、基础（CK：≤4500 kg·hm^{-2}）4个产量水平。研究4个产量水平下新疆冬小麦开花期上、中、下冠层的光截获特性及干物质积累与分配特性，分析其与产量构成的相关性，探究增产途径。结果表明：产量水平高的群体在灌浆期仍能保持较高的叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）；随着产量水平的提高，冠层上、中、下层的PAR截获率和PAR截获量均提高，且总体表现为上层>中层>下层，呈现"上强下弱"的垂直分布特征，PAR透射率变化趋势与之相反；中层干物质积累量要低于上、下层干物质积累量，且上层干物质随着产量水平的升高增幅要大于中层和下层，干物质上、中、下层均与PAR截获率呈极显著相关，与籽粒产量的相关系数分别为0.97、0.90、0.78。可见花后维持较高LAI，提高光合有效辐射截获量（IPAR），增加开花后干物质积累，是实现小麦增产，缩小产量差的途径。

关键词：冬小麦；光合有效辐射；光截获；干物质；产量；新疆

新疆小麦产量占据新疆粮食总产量的41%以上，是新疆全区粮食安全发展的关键。小麦生产中产量差距较大，目前新疆冬小麦最高产量为12492.45 kg·hm^{-2}（2019年），是全区平均产量6000 kg·hm^{-2}的2.08倍。不同管理模式会形成不同的产量水平，不同产量水平就会形成不同的群体[1]，那么不同群体之间光能的分布是怎样的呢？对此许多学者通过不同品种[2-3]、不同播种方式[4]、不同施肥方式[5-8]、不同灌溉方式[9-10]等措施构建了多层次产量，已有研究表明氮、磷、钾的合理施用可以有效提高小麦开花后植株中上层和总冠层光合有效辐射截获量（IPAR）、光合有效辐射截获率（CaR）及消光系数，降低冠层各层次光合有效辐射透射率（PeR）等[5-7]。高产栽培模式小麦全生育期的IPAR、干物质积累量和籽粒产量显著高于农民习惯栽培模式[11]。李志勇等[12]认为优化水肥处理小麦的群体消光系数、各层透光率与传统水肥处理差异很小，秸秆还田优化水肥处理可改善冠层结构和光分布状况，增加单位面积籽粒产量。更多的学者是通过单一的栽培管理措施形成的不同群体，且对产量差距的跨度研究涉及有限，因此本文设置两地试验，根据当地栽培条件（适宜的播量、播期、灌水频次），采用当地主栽品种，配以不同梯度的"有机肥+无机肥"，构建更多还原超高产（≥9000 kg·hm^{-2}）、高产（7500~9000 kg·hm^{-2}）、农户（6000~7500 kg·hm^{-2}）和基础（≤4500 kg·hm^{-2}）4个产量水平群体，旨在解析新疆不同产量水平冬小麦群体冠层内光截获、各层次干物质积累特性，分析不同产量水平形成的差异与机

收稿日期：2020-05-26； **修订日期：**2020-08-07
基金项目：国家重点研发计划项目子课题（2016YFD0300110）；新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2019D01B26）；农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室开放课题（25107020-201903）
作者简介：王立红（1990-），女，硕士研究生，主要研究方向为作物高产栽培. E-mail: 1498877605@qq.com
通讯作者：赵奇. E-mail: zhaoqi@xaas.ac.cn

制，为优化和改进栽培技术措施，缩小产量差距，提升小麦产量提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2018—2019年在新疆昌吉地区军户农场新疆小麦育种家基地和奇台县西地镇进行，试验地位于新疆天山北麓，准噶尔盆地东南缘，属中温带区，为典型的大陆性干旱气候。

军户农场试验点地处87°E，44°10′N，海拔高度756 m，年日照时数为2700 h，年≥10 ℃积温为3450 ℃，年平均气温6.8 ℃，年平均降水量为190 mm，无霜期为150 d左右。试验地土壤类型为壤土（表1）。以冬小麦品种“新冬41号”为试验材料，通过水肥管理设置超高产、高产、农户、不施肥共4种管理模式，分别模拟超高产（SH）、高产（HH）、农户（FP）、基础（CK）共4个产量水平，试验施肥方案详见表2。每个处理11 m×25 m=275 m^2，每个处理3次重复。采用1管6行的滴灌带配置，行距0.16 m，播种密度为450×10^{4}株·hm^{-2}，灌水采用滴灌，水量用水表和球阀控制，田间滴水共9次，滴水量4500方·hm^{-2}，追肥随水滴施。

奇台西地镇试验点地处89°E，43°40′N，海拔高度755 m，年平均气温4.8 ℃，年≥10 ℃积温为3123 ℃，平均无霜期160 d，平均年降水量176 mm。试验地土壤类型为壤土（表1）。以冬小麦品种“新冬36号”为试验材料，水肥管理同军户试验设置。试验施肥方案详见表2。每个处理11 m×25 m=275 m^2，每个处理3次重复。采用1管4行的滴灌带配置，行距0.16 m，播种密度为400×10^{4}株·hm^{-2}，灌水采用滴灌，水量用水表和球阀控制，田间滴水共7次，滴水量4500方·hm^{-2}。追肥随水滴施。

1.2 测定指标

1.2.1 叶面积指数 在孕穗期、开花期、灌浆期每个处理连续选取10株有代表性的植株，测量每株绿

表1 播前土壤基础肥力

Tab. 1 Soil basic fertility before sowing

试验区	处理	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
军户	SH	14.044	0.839	0.924	21.648	50.858	16.371	153
	HH	12.273	0.827	0.926	21.725	44.018	14.819	132
	FP	11.352	0.807	1.004	22.078	43.311	14.262	136
	CK	10.499	0.738	0.906	22.672	35.250	7.208	125
奇台	SH	33.100	1.747	1.448	18.787	81.367	8.183	365
	HH	30.198	1.729	1.451	19.566	89.778	24.130	327
	FP	29.962	1.673	1.481	20.371	145.735	15.147	331
	CK	17.094	1.637	1.414	18.871	82.074	6.939	282

注：SH表示超高产；HH表示高产；FP表示农户；CK表示基础。由于每个处理前一年进行了预试验，所以每个处理的土壤背景值不同。下同。

表2 试验区田间施肥情况

Tab. 2 Fertilization application in the field experiments

试验区	处理	基肥	返青期（春3叶）	起身期（春4叶）	拔节期（第一节1.5～2 cm）	拔节期（拔节后10～12 d）	孕穗期（旗叶展开）	开花期（中部小穗开花）	灌浆期（开花后10～12 d）	灌浆期（间隔8～10 d）	灌浆期（间隔8～10 d）
		有机肥+二胺/(kg·hm^{-2})	尿素+硫酸钾/(kg·hm^{-2})				尿素+磷酸二氢钾/(kg·hm^{-2})				
军户	SH	7500+375	90+0	90+0	150+30	90+30	90+0	90+0	75+30	0+15	0+15
	HH	3000+300	75+0	75+0	90+30	75+15	75+0	75+0	60+30	0+15	–
	FP	1500+225	45+0	45+0	75+30	45+0	45+0	45+0	45+30	0+15	–
	CK	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
奇台	SH	7500+375	–	90+0	150+30	90+30	90+0	75+0	45+30	0+15	–
	HH	3000+300	–	75+0	90+30	75+15	75+0	60+0	45+30	0+15	–
	FP	1500+225	–	45+0	75+30	45+0	45+0	45+0	45+30	0+15	–
	CK	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

色叶片的长和宽,并计算叶面积(长×宽×0.83)[13]和叶面积指数(LAI)(单茎叶面积×1 hm^2 总茎数/10^4)。

1.2.2 冠层光截获特性 根据张振等[14]的小麦冠层分层法,于小麦开花后第0 d和第10 d晴朗无云天气,在12:00—13:00用作物冠层分析仪Sunscan(Delta T, UK)测定PAR。根据以下公式计算不同层次PAR截获率(CaR)、透射率(PeR)和截获量(IPAR)[14]。

$$CaR = (PAR_n - PAR_{n-1})/PAR_T \times 100\% \quad (1)$$

$$PeR = PAR_{n-1}/PAR_n \quad (2)$$

$$IPAR = R \times CaR \times 0.5 \quad (3)$$

式中:PAR_T表示自然光照下的光合有效辐射;n分别表示h(小麦植株贴近地面至穗部的高度)、$2/3h$、$1/3h$处;$n-1$表示$2/3h$、$1/3h$、$0h$处。计算冠层总CaR、总PeR时,n与$n-1$表示h、$0h$处。R表示实际光合有效辐射总量,数据来源于试验基地气象观测站。

1.2.3 不同层次干物质分布 于开花期取样,每个处理取20个单茎,3次重复。将植株分为上、中、下层3部分干物质,各层次划分与1.2.2节小麦冠层分层法一致。将样品80 ℃烘干至恒重,植株干物质积累量为各层干物质之和。

1.2.4 产量及其构成测定 在小麦成熟期,从每个重复随机选择5个1 m^2样方,调查产量结构、计产量。定点样考种,调查株高、节间长度、穗部性状、千粒重、生物量、经济产量。

1.3 数据处理

采用Excel 2010软件处理数据和绘图,采用DPS 7.05软件进行数据统计分析,以LSD法检验差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 新疆冬小麦产量及产量构成因素

据表3可知,两个试验区的试验均符合试验设计的要求,均表现为不同处理间收获穗数、穗粒数随着产量水平的升高而提高,千粒重均为HH>SH>FP>CK。军户4个处理间,收获穗数仅SH与CK处理差异显著;穗粒数差异显著,SH处理的穗粒数分别是HH、FP和CK处理的1.09、1.26和2.21倍;千粒重SH、HH处理间差异不显著,但均与FP和CK差异显著。奇台SH处理收获穗数均与HH、FP、CK处理差异显著;SH处理的穗粒数分别是HH、FP和CK的1.09、1.13倍和2.32倍;千粒重以HH最高,均与FP和CK处理差异显著。两个试验区的籽粒产量4个处理间差异均显著。由此可知在保持一定收获穗数的基础上,目标籽粒产量为7500~9000 $kg \cdot hm^{-2}$时,应主攻冬小麦穗粒数与千粒重的协调增加;目标籽粒产量≥9000 $kg \cdot hm^{-2}$时,主攻穗粒数增加。

2.2 不同产量水平群体LAI比较

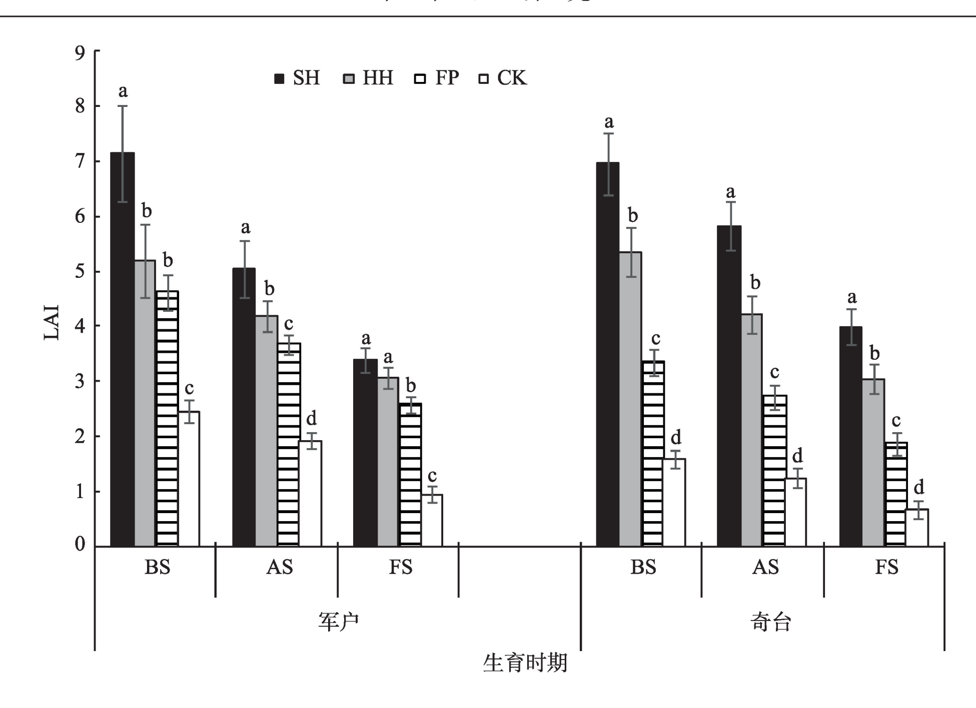
各时期LAI均随着产量水平的提高而提高(图1)。军户孕穗期SH处理的LAI分别比HH、FP和CK提高37.76%、54.76%和190.65%;开花期SH处理的LAI分别比HH、FP和CK提高20.81%、37.98%和161.66%,4个处理间差异均显著;灌浆期SH处理的LAI分别比HH、FP和CK提高11.11%、31.78%和257.89%,SH与HH处理间差异不显著,均与FP、CK差异显著。奇台与军户在孕穗期、开花期和灌浆期小麦的LAI趋势表现一致。由此可知,孕穗期后,随着生育时期的推进,LAI呈下降趋势,产量水平高的群体在灌浆期仍能保持较高的LAI。

表3 不同产量水平下新疆冬小麦产量及产量构成因素

Tab. 3 Yield and yield components of Xinjiang winter wheat under different yield levels

试验区	处理	收获穗数/(10^4穗·hm^{-2})	穗粒数	千粒重/g	籽粒产量/(kg·hm^{-2})
军户	SH	535.67 ±43.88a	42.18±1.79a	52.39±0.69a	9342.80±823.22a
	HH	502.00±33.15ab	38.55±1.75b	52.44±0.39a	8137.20±453.53b
	FP	494.33±25.11ab	33.45±3.19c	48.09±3.03b	6860.20±515.24c
	CK	474.00±14.48b	19.07±3.38d	44.48±1.28c	2719.40±563.69d
奇台	SH	522.75±45.81a	40.80±3.74a	47.58±0.30b	9003.81±788.97a
	HH	468.25±16.86b	37.40±3.81b	48.82±0.59a	7869.54±283.35b
	FP	422.75±14.57b	36.20±3.05b	46.35±1.09c	6029.65±207.79c
	CK	335.50±36.24c	17.60±1.78c	45.77±0.43c	2558.47±276.40d

注:同指标不同小写字母表示处理间达5%显著水平差异。下同。



注：BS表示孕穗期；AS表示开花期；FS表示灌浆期；SH表示超高产；HH表示高产；FP表示农户；CK表示基础。不同的小写字母表示在0.05水平上存在显着差异。

图1　不同产量水平的LAI对比

Fig. 1　Comparison of LAI of different yield levels

2.3　不同产量水平群体冠层光截获特性的比较

2.3.1　PAR截获率　开花期小麦冠层上层PAR截获率(CaR)为SH最高(表4)，军户SH较HH、FP和CK处理分别高69.61%、99.33%和225.64%，奇台SH较HH、FP和CK处理分别高56.40%、100.06%和132.48%；中层两试验区的SH、HH、FP 3处理间均无差异，军户FP最高，奇台HH最高，两试验区CK处理均显著较低；下层均无显著性差异；总冠层CaR两试验区均表现为SH>HH>FP>CK，军户SH、HH、FP 3个处理间无显著性差异，奇台SH和HH均与FP间差异显著，比其高59.43%和36.31%。由此可知群体冠层CaR表现为上层>中层>下层，上层变幅显著，中层和下层变幅不显著。军户和奇台SH上层CaR占总冠层的比率为66.25%、78.22%，中、下层各占28.22%、5.52%和14.03%、7.76%，上层占比高于HH、FP处理，所以SH群体总冠层CaR较高的主要原因是上层CaR较高。

2.3.2　PAR透射率　PAR透射率(PeR)与CaR的变化趋势相反(表4)，开花期小麦冠层上层PeR为SH最低，均与HH、FP差异显著，军户SH较HH、FP和CK处理分别降低44.91%、49.61%和57.15%，奇台SH较HH、FP和CK处理分别降低44.20%、52.35%和55.59%；中层PeR为SH最低，CK最高，军户SH与HH、FP差异显著，分别降低56.50%、55.83%，奇台SH处理与HH和FP处理间差异不显著，与CK差异显著；下层处理间均无显著差异。总冠层PeR为SH最低，随着产量水平的提高，总冠层PeR呈降低趋势。

2.3.3　PAR截获量　由表4可知，开花期冠层上层和总冠层的PAR截获量(IPAR)4个处理随着产量水平的增高而增高。开花期小麦冠层上IPAR为SH最高，军户SH较HH、FP和CK处理分别高68.53%、98.35%和207.01%，奇台SH较HH、FP和CK处理分别高56.11%、99.29%和293.01%；军户SH、HH、FP和CK处理的中层和下层IPAR分别合计为：2.45、4.22、4.10 MJ·m^{-2}和2.72 MJ·m^{-2}，奇台SH、HH、FP和CK处理的中层和下层IPAR分别合计为：1.57、2.56、1.70 MJ·m^{-2}和1.12 MJ·m^{-2}。群体冠层IPAR表现为上层>中层>下层，SH群体冠层上层IPAR显著高于其他处理，是总冠层IPAR较高的主要原因；随着产量的提高，群体冠层上层和中层PAR截获率和截获量，总IPAR增加，减少了漏光损失，进而提高产量。

2.4　不同产量水平群体冠层各层次干物质积累与分配

开花期小麦冠层上层干物质积累量为SH最高，处理间显著差异(表5)。军户SH比HH、FP和CK分别增加24.42%、62.77%和164.22%，奇台SH比

表4 开花期不同产量群体的冠层光截获特性分析

Tab. 4 Analysis of canopy light interception characteristics of populations with different yield levels at flowering stage

指标	试验区	处理	上层	中层	下层	总冠层
CaR/%	军户	SH	62.23±6.37a	26.51±6.09ab	5.18±0.97a	93.93±0.87a
		HH	36.69±12.60b	34.34±8.49a	19.78±5.72a	90.82±2.11a
		FP	31.22±17.19b	36.71±13.95a	17.13±15.79a	85.05±10.47a
		CK	19.11±14.47b	16.36±4.82b	16.45±15.02a	51.92±11.56b
	奇台	SH	68.72±4.11a	12.33±5.3 a	6.82±5.21a	87.86±4.27a
		HH	43.94±0.34b	15.81±2.05a	15.37±3.72a	75.12±2.02a
		FP	34.35±5.39bc	14.90±0.57a	5.86±3.58a	55.11±1.23b
		CK	29.56±6.54c	1.59±0.63b	12.07±8.30a	43.22±9.39b
PeR/%	军户	SH	34.66±7.37b	19.96±0.80c	6.29±9.25a	1.48±0.44c
		HH	63.31±12.60a	45.89±7.96b	15.46±20.38a	9.18±2.11bc
		FP	68.78±17.19a	45.19±18.94b	19.40±18.27a	14.95±10.47b
		CK	80.89±14.47a	79.55±5.29a	22.87±37.80a	48.08±11.56a
	奇台	SH	31.28±4.11c	59.11±22.55b	66.76±10.87a	12.14±4.27b
		HH	56.06±0.34b	71.81±3.48ab	61.98±7.64a	24.88±2.02b
		FP	65.65±5.39ab	77.27±0.99ab	79.43±19.15a	44.89±1.23a
		CK	70.44±6.54a	97.77±0.69a	83.36±20.79a	56.78±9.39a
IPAR/(MJ·m^{-2})	军户	SH	4.82±0.49a	2.05±0.47ab	0.40±0.07a	7.28±0.07a
		HH	2.86±0.98b	2.68±0.67a	1.54±0.44a	7.07±0.20a
		FP	2.43±1.49b	2.87±1.22a	1.23±1.02a	6.54±1.08a
		CK	1.57±1.18b	1.35±0.39b	1.37±1.25a	4.30±0.95b
	奇台	SH	5.62±0.33a	1.01±0.44a	0.56±0.43a	7.19±0.34a
		HH	3.60±0.03b	1.30±0.17a	1.26±0.31a	6.15±0.17a
		FP	2.82±0.45bc	1.22±0.05a	0.48±0.29a	4.53±0.11b
		CK	1.43±0.54c	1.13±0.05a	0.99±1.26a	3.55±0.77b

表5 不同产量水平群体冠层各层次干物质差异

Tab. 5 Dry matter accumulation and distribution in different canopy layers of different yield levels

试验区	处理	上层干物质/(g·m^{-2})	中层干物质/(g·m^{-2})	下层干物质/(g·m^{-2})	干物质总和/(g·m^{-2})
军户	SH	622.58±53.75a	501.95±27.88a	651.42±25.16a	1775.95±106.95a
	HH	500.39±14.43b	452.46±27.70a	594.97±24.15a	1547.82±80.31b
	FP	382.48± 9.00c	379.23±27.38b	590.91±24.45a	1352.61±60.83b
	CK	235.63±23.59d	234.56±2.94c	363.53±16.42b	833.72±42.95c
奇台	SH	561.28± 9.89a	391.70± 5.39a	489.08± 2.41a	1442.06±17.69a
	HH	459.58± 5.46b	333.71± 1.40b	401.24± 2.32b	1194.54±9.18b
	FP	318.75± 3.75c	256.16± 6.51c	303.12± 3.80c	878.04±14.06c
	CK	178.84±14.55d	125.89± 3.00d	168.71± 0.16d	473.43±11.72d

HH、FP和CK分别增加22.13%、79.85%和213.84%;中层干物质积累量为SH最高,军户SH比HH、FP和CK分别增加10.94%、32.36%和114.00%,SH、HH均与FP和CK处理差异显著,奇台SH比HH、FP和CK处理分别增加17.38%、52.91%和211.14%,处理间差异均显著;下层干物质积累量为SH最高,军户SH比HH、FP和CK分别增加9.49%、10.24%和79.19%,SH、HH和FP3个处理间无显著差异,均与CK显著差异,奇台SH比HH、FP和CK处理分别增加21.89%、61.35%和189.89%,差异显著。总干物质积累量为SH最高,军户SH均与其他3个处理显著差异,SH比HH、FP和CK分别增加14.74%、31.30%和113.02%,奇台4个处理间差异显著,SH比HH、FP和CK分别增加20.72%、64.24%和204.60%。由此

可知随着产量提高,群体冠层各层和总干物质积累量增加,上层积累量显著增加。

2.5 群体冠层干物质积累与LAI、PAR截获参数及产量的相关性

收获穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量、开花期LAI、总冠层CaR、总冠层IPAR均与各冠层干物质呈显著或极显著正相关,总冠层PeR与各冠层干物质呈极显著负相关。LAI与IPAR呈正相关关系(表6)。

3 讨 论

3.1 新疆冬小麦不同产量水平冠层光截获特性与各层干物质积累量特性

小麦的产量潜力取决于整个生长季节中积累的光合产物或收获时分配到谷物中的总生物量的一部分[15]。群体冠层的光截获量和透光率是决定作物干物质积累、后期产量的重要因素[16]。郑雪娇等[5]在氮肥试验中发现各层次营养器官干物质积累量、籽粒干物质积累量和植株总干物质积累量与上层和中层CaR呈显著正相关,与下层CaR无显著相关。张艳敏等[17]研究认为,低产群体内上、中、下各层的消光系数差异不大;过旺群体中下部光环境差,叶片早衰;高产群体冠层上部消光系数较小,利于光向冠层深处透射;中下部消光系数较大,有利于截获较多的光能。本研究认为群体冠层IPAR、冠层各层干物质和总干物质积累量均表现为超高产模式(SH)>高产模式(HH)>农户模式(FP)>不施肥(CK)处理。SH、HH和FP较CK提高了群体冠层上层和中层PeR和IPAR,减少了漏光损失,从而提高光能利用率,进而提高产量。超高产模式冠层上层IPAR增加明显,群体冠层IPAR表现为上层>中层>下层,郭培武等[7]、郑雪娇等[5]研究认为,小麦植株冠层各层次的冠层IPAR均为中层>上层>下层。这可能与品种、土壤肥力、试验设置、环境条件等综合因素有关。由此可知,上、中层CaR是影响干物质积累和籽粒产量的重要因素。

表6 各指标与群体冠层干物质积累的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis of each index and canopy dry matter accumulation

指标	上层干物质/(g·m^{-2})	中层干物质/(g·m^{-2})	下层干物质/(g·m^{-2})	总干物质/(g·m^{-2})	开花期LAI
收获穗数/(10^{4}穗·hm^{-2})	0.83**	0.90**	0.91**	0.91**	0.83**
穗粒数	0.91**	0.85**	0.71*	0.85**	0.90**
千粒重/g	0.81**	0.87**	0.79*	0.85**	0.67*
籽粒产量/(kg·hm^{-2})	0.97**	0.90**	0.78*	0.91**	0.96**
开花期LAI	0.97**	0.87**	0.76*	0.89**	–
CaR总层/%	0.93**	0.97**	0.94**	0.98**	0.91**
PeR总层/%	−0.94**	−0.98**	−0.95**	−0.99**	−0.91**
IPAR总层/(MJ·m^{-2})	0.95**	0.96**	0.91**	0.97**	0.94**

注:*代表显著相关(P<0.05);**代表极显著相关(P<0.01)。

3.2 新疆冬小麦不同产量水平冠层光截获特性与产量构成

冠层光截获能力与产量密切相关,本研究发现收获穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量、开花期LAI、总冠层CaR、总冠层IPAR均与各冠层干物质呈显著或极显著正相关,总冠层PeR与各冠层干物质呈极显著负相关。有研究认为一定氮钾配施条件下,适量配施磷肥利于提高小麦群体IPAR值,增加开花后干物质积累和籽粒产量[6]。Salvagiotti等[18]研究认为,施氮量由26 kg·hm^{-2}逐渐增加至104 kg·hm^{-2},小麦植株冠层IPAR呈线性增加趋势,最高为90%。超高产栽培模式小麦全生育期的光能截获量、光能利用效率、干物质积累量和籽粒产量显著高于农民习惯栽培模式,高产栽培模式的小麦全生育期光能截获量较低,但其光能利用效率、干物质积累量及收获指数均显著提高,从而使其籽粒产量显著提高[11]。本研究中产量高的群体冠层上部光截获能力占比较大,IPAR随着产量的增加而增加,中上部截获能力较强,籽粒产量≥7500 kg·hm^{-2}时,PeR则大于90%,尤其是中上部PeR较高,所以要适当的增加高产田的中上部光截获能力,可以有效提高产量。

4 结 论

本文以冬小麦为研究对象,通过栽培管理措施形成4个产量水平:籽粒产量≥9000 kg·hm^{-2}的超高

产处理,籽粒产量7500~9000 kg·hm^{-2}的高产处理,籽粒产量6000~7500 kg·hm^{-2}的农户处理,籽粒产量≤4500 kg·hm^{-2}的基础产量处理。探讨了4个产量水平下冬小麦开花期上、中、下冠层的光截获特性及干物质积累与分配特性,得到如下结论:

(1)随着产量水平的提高,冠层的PAR截获率和PAR截获量均呈现"上强下弱"的垂直分布特征,PAR透射率与之相反。冠层上层和中层的光能截获是农户突破高产和超高产的关键,各层干物质与各冠层光截获特性密切相关。

(2)中层干物质积累量要低于上、下层干物质积累量,且上层干物质随着产量水平的升高增幅要大于中层和下层,籽粒产量与各冠层干物质密切关系为上层>中层>下层。

(3)维持群体高LAI,增强冠层中、上部PAR截获率和PAR截获量,增加开花后干物质积累量,可以有效提高小麦产量。

参考文献(References):

[1] 王立红, 张宏芝, 王重, 等. 新疆冬小麦不同产量水平群体特性分析[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(5): 594-600. [Wang Lihong, Zhang Hongzhi, Wang Zhong, et al. Population characteristics of different yield levels of winter wheat in Xinjiang[J]. Journal of Wheat Crops, 2020, 40(5): 594-600.]

[2] 梁鹏, 郭德胜, 刘德峻, 等. 拔节期渍水后施用尿素对小麦产量和光合物质生产的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 202-209. [Liang Peng, Guo Desheng, Liu Dejun, et al. Effects of urea application after water logging at stem elongation stage on grain yield and photosynthetic production in wheat[J]. Journal of Wheat Crops, 2020, 40(2): 202-209.]

[3] 胡延吉, 兰进好. 山东省冬小麦品种冠层结构及光截获的研究[J]. 中国农业气象, 2001, 22(3): 29-33. [Hu Yanji, Lan Jinhao. Canopy architecture and light interception of winter wheat cultivars in Shandong province[J]. Chinese Agricultural Meteorology, 2001, 22(3): 29-33.]

[4] 陈素英, 张喜英, 毛任钊, 等. 播期和播量对冬小麦冠层光合有效辐射和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 681-685. [Chen Suying, Zhang Xiying, Mao Renzhao, et al. Effect of sowing date and rata on canopy intercepted photo-synthetically active radiation and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 681-685.]

[5] 郑雪娇, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对测墒补灌小麦冠层不同层次光截获和干物质分布的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 531-537. [Zheng Xuejiao, Yu Zhenwen, Zhang Yongli, et al. Effects of nitrogen application on light interception and dry matter distribution at different layers in wheat canopy under supplemental irrigation based on measuring soil moisture[J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 531-537.]

[6] 岳俊芹, 张德奇, 李向东, 等. 氮钾配施下施磷对冬小麦群体发育特性、冠层光截获及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 840-851. [Yue Junqin, Zhang Deqi, Li Xiangdong, et al. Effects of phosphorus on winter wheat population characteristics, canopy intercepted photosynthetically active radiation and yield under certain nitrogen-potassium rates[J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2016, 49(5): 840-851.]

[7] 郭培武, 赵俊晔, 石玉, 等. 水肥一体化条件下施氮量对小麦冠层光截获特性和产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(8): 81-85. [Guo Peiwu, Zhao Junye, Shi Yu, et al. Effects of nitrogen application rate on canopy photosynthetic active radiation interception and yield of wheat under integration of water and fertilizer [J]. Shandong Agriculture Science, 2018, 50(8): 81-85.]

[8] 蒋阿宁, 高聚林, 管建慧, 等. 变量施肥对开花后冬小麦冠层光辐射性能及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(1): 255-259. [Jiang Aning, Gao Julin, Guan Jianhui, et al. Effects of variable nitrogen application on character of light radiation and yield in canopy of winter wheat after anthesis[J]. Journal of Southwest Agriculture, 2015, 28(1): 255-259.]

[9] 杨传邦, 于振文, 张永丽, 等. 测墒补灌深度对济麦22冠层光截获和荧光特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(2): 253-262. [Yang Chuanbang, Yu Zhenwen, Zhang Yongli, et al. Effect of soil depth with supplemental irrigation on canopy photosynthetically active radiation interception and chlorophyll fluorescence parameters in Jimai 22[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(2): 253-262.]

[10] 刘海红, 于志青, 毕建杰, 等. 干旱与灌溉处理对冬小麦冠层内光分布的影响[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 38-43. [Liu Haihong, Yu Zhiqing, Bi Jianjie, et al. Influence of drought and irrigation treatment on the distribution of light in winter wheat canopy [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(3): 38-43.]

[11] 王月超, 李传兴, 代兴龙, 等. 栽培模式对冬小麦光能利用和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2707-2713. [Wang Yuechao, Li Chuanxing, Dai Xinglong, et al. Effects of cultivation patterns on the radiation use and grain yield of winter wheat[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2707-2713.]

[12] 李志勇, 王小东. 优化水肥与传统水肥对冬小麦叶片生长、群体光分布及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2005(3): 55-57. [Li Zhiyong, Wang Xiaodong. Effects of the optimized irrigation-optimized fertilization and traditional irrigation- traditional on leaf growth, population light distribution and grain yield of winter wheat[J]. Henan Agricultural Sciences, 2005(3): 55-57.]

[13] 崔月, 张宏芝, 赵奇, 等. 水肥运筹对滴灌冬小麦干物质积累和产量调控效应研究[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(4): 618-626. [Cui Yue, Zhang Hongzhi, Zhao Qi, et al. Effect of irrigation and fertilization on dry matter accumulation and yield control of drip irrigation winter wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(4): 618-626.]

[14] 张振, 于振文, 张永丽, 等. 氮肥基追比例对测墒补灌小麦冠层

不同层次光能利用及干物质转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 97−105. [Zhang Zhen, Yu Zhenwen, Zhang Yongli, et al. Effects of basal/topdressing nitrogen ratios on light interception and dry matter transport at different layers of wheat canopy under supplemental irrigation based on soil moisture[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Journal of Materials Science, 2019, 25(1): 97−105.]

[15] Sourav Maity, Puspendu Dutta, Saikat Das. Impact of pre-anthesis photosynthetic traits on yield of wheat cultivars under in vivo condition: Insight based on biochemical models[J]. Vegetos: An International Journal of Plant Research, 2020, 33(12): 106−116.

[16] 陈雨海, 余松烈, 于振文. 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 730−734. [Chen Yuhai, Yu Songlie, Yu Zhenwen. Relation between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communitie [J]. Acta Crops Sinica, 2003, 29(5): 730−734.]

[17] 张艳敏, 李晋生, 钱维朴, 等. 小麦冠层结构与分光分布研究[J]. 华北农学报, 1996, 11(1): 54−58. [Zhang Yanmin, Li Jinsheng, Qian Weipu, et al. Canopy structure and light distribution in winter wheat[J]. North China Agricultural Journal, 1996, 11(1): 54−58.]

[18] Salvagiotti F, MirallesI D J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28 (3): 282−290.

Analysis of canopy light interception and dry matter distribution characteristics of different winter wheat yield groups in Xinjiang

WANG Lihong[1,2], ZHANG Hongzhi[1,2], LI Jianfeng[1,2], WANG Zhong[1,2], GAO Xin[1,2], SHI Jia[1,2], ZHANG Yueqiang[1,2], FAN Zheru[1,2], ZHAO Qi[1,2]

(1. Institute of Nuclear Technology and Biotechnology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Oasis-Desert Crop Physiology Ecology and Cultivation of Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Urumqi 830091, Xinjiang, China)

Abstract: The effects of photosynthetically active radiation (PAR) interception, dry matter distribution, and the yield of winter wheat at different yield levels were studied to provide a theoretical basis for narrowing the yield gap, improving the utilization of light energy resources, and high-yield cultivation of winter wheat in the Xinjiang province. This experiment was conducted in Junhu and Qitai regions from 2018 to 2019. The main varieties planted in the region were used as experimental materials, and the integrated management model was adopted to simulate the four yield levels, namely, super high (SH: ≥9000 kg·hm^{-2}), high (HH: 7500−9000 kg·hm^{-2}), peasant household (FP: 6000−7500 kg·hm^{-2}), and basic yields (CK: ≤4500 kg·hm^{-2}). The characteristics of light interception, dry matter accumulation, and distribution in the upper, middle, and lower canopies of winter wheat at the four yield levels were studied, and the correlation between them and yield composition was analyzed to explore ways of increasing yield. The results showed that the population with a high-yield level could still maintain a high leaf-area index (LAI) during its grouting stage. With production level increased, PAR interception rate and volume in the upper, middle, and lower layers of the canopy all increased, and the overall performance was greater in the upper than in the middle layer, presenting a vertical distribution characteristic of “strong at the top and weak at the bottom.” The variation trend of PAR transmittance was opposite. Dry matter accumulation in the middle layer was lower than in the upper and lower layers, and dry matter increase in the upper layer was greater than in the middle and lower layers, with an increase in yield level. The dry matter accumulation in the upper, middle, and lower layers was significantly correlated with the PAR interception rate, and the correlation coefficient with grain yield was 0.97, 0.90, and 0.78, respectively. Therefore, maintaining high LAI, increasing PAR interception, and increasing dry matter accumulation after flowering are approaches to achieving increased wheat yield and reduced yield difference.

Keywords: winter wheat; photosynthetically active radiation; light interception; dry matter; yield; Xinjiang